



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# FRÉZOVACÍ NÁSTROJE Z HSS OCELÍ S NANOKOMPOZITNÍMI POVLAKY

HSS MILLING CUTTERS DEPOSITED BY NANOCOMPOSITE COATINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

RADEK LUDVÍK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. ALEŠ JAROŠ

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Radek Ludvík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Frézovací nástroje z HSS ocelí s nanokompozitními povlaky**

v anglickém jazyce:

### **HSS milling cutters deposited by nanocomposite coatings**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřena na rozbor metody frézování, charakteristiku rychlořezných ocelí a základních povlakovacích metod. Další část práce je zaměřená na nanokompozitní povlaky nanášené na frézovací nástroje vyrobené z HSS ocelí.

Cíle bakalářské práce:

Úvod

1. Charakteristika metody frézování
2. Charakteristika rychlořezných ocelí
3. Charakteristika základních povlakovacích metod
4. Nanokompozitní povlaky nanesené na frézovací nástroje z HSS ocelí

Závěr

Seznam odborné literatury:

- [1] PTÁČEK,L.a kol.. Nauka o materiálu I. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2002. 392 s. ISBN: 80-7204-283-1.
- [2] FOREJT,M.,PÍŠKA,M. Teorie obrábění,tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [3] HUMÁR,A. Materiály pro řezné nástroje. 1.vyd. Praha: MM publishing, s.r.o.,2008. 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [4] MATTOX,M. Handbook of Physical Vapour Deposition (PVD) Processing. 2.vyd.Albuquerque (USA): APR,2010. 917s. ISBN: 978-0-8155-2037-5.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Jaroš

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá nanokompozitními povlaky nanesenými na frézovací nástroje z rychlořezných ocelí. V práci jsou popsány základy frézování, nástroje pro frézování a jejich rozdělení a upínání. Postupně je rozebrána problematika rychlořezných ocelí (jejich rozdělení, značení, vlastností a použití, chemické složení a tepelné zpracování). Poté je popsána základní charakteristika povlakovacích metod (rozdělení povlaků do generací, příprava povrchů před povlakováním a metoda PVD a CVD). Poslední část bakalářské práce je zaměřena na vlastnosti nanokompozitních materiálů a na společnosti zabývajícími se jejich nanášením na rychlořezné oceli.

### Klíčová slova

frézování, frézy, rychlořezná ocel, PVD, CVD, nanokompozitní

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with nanocomposite coatings deposited on cutting tools of high speed steel. The paper describes the fundamentals of milling, tools for milling and their division and clamping. Gradually, there are analyzed problems of high speed steels (their classification, marking, properties and uses, chemical composition and heat treatment). Then there is described the main characteristics of coating methods (division of coatings into generations, surface preparation before the coating and PVD and CVD methods). The last part of the thesis focuses on the properties of nanocomposite materials and to companies dealing with their application to the high-speed steel.

### Key words

milling cutters, high speed steel, PVD, CVD, nanocomposite

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LUDVÍK, R. Frézovací nástroje z HSS ocelí s nanokompozitními povlaky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš.

**PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Frézovací nástroje z HSS ocelí s nanokompozitními povlaky** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

29. 5. 2015

Datum

---

Radek Ludvík

**PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Aleši Jarošovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ .....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD .....	8
1 CHARAKTERISTIKA METODY FRÉZOVÁNÍ .....	9
1.1 Válcové frézování .....	10
1.1.1 Sousledné frézování .....	10
1.1.2 Nesousledné frézování .....	11
1.2 Čelní frézování.....	11
1.3 Frézovací nástroje .....	11
1.4 Upínání frézovacích nástrojů .....	13
1.5 Upnutí obrobku .....	13
2 CHARAKTERISTIKA RYCHLOŘEZNÝCH OCELÍ.....	14
2.1 Rozdělení rychlořezných ocelí.....	14
2.2 Značení rychlořezných ocelí .....	14
2.3 Mechanické vlastnosti.....	15
2.4 Chemické složení .....	17
2.5 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí .....	19
3 CHARAKTERISTIKA ZÁKLADNÍCH POVLAKOVACÍCH METOD .....	21
3.1 Rozdělení povlaků do generací.....	21
3.1.1 Povlaky 1. generace .....	21
3.1.2 Povlaky 2. generace .....	21
3.1.3 Povlaky 3. generace .....	21
3.1.4 Povlaky 4. generace .....	22
3.2 Čištění a příprava před povlakováním .....	22
3.3 Metoda PVD .....	24
3.3.1 Naprašování .....	25
3.3.2 Napařování.....	26
3.3.3 Iontová implantace.....	27
3.4 Metoda CVD.....	27
3.5 Vlastnosti povlaků .....	29
4 NANOKOMPOZITNÍ POVLAKY NANESENÉ NA FRÉZOVACÍ NÁSTROJE Z HSS OCELÍ.....	30
4.1 Charakteristika nanokompozitních povlaků .....	30

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	7
---------	------------------	------	---

4.2 Výrobci frézovacích nástrojů vyrobených z HSS .....	30
4.3 Společnosti zabývající se depozicí PVD povlaku na HSS frézy .....	32
ZÁVĚR .....	37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	38
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	40



## ÚVOD

Dnešní frézování se od počátků 19. století, kdy vznikl první frézovací stroj, stalo velmi univerzální metodou obrábění. Frézování je výrobní technologie třískového obrábění, která je založena na odebírání materiálu mnohobřitým rotačním nástrojem. Frézovat můžeme nejen rovinné plochy, ale i rotační vnitřní a vnější plochy, různé tvarové plochy, dutiny a závit. V dnešní době lze frézováním vytvářet povrchy dokonalé jakosti, čehož bylo v dřívějších dobách možné dosáhnout jen broušením. Vyvíjí se ve stále univerzálnější metodu obrábění a to díky rostoucí mnohostrannosti použití obráběcích stojů, řídicích systémů a řezných nástrojů.

Mezi materiály, které se používají pro řezné nástroje, jsou nástrojové oceli, u kterých se díky pokroku technologie výroby oceli zvýšily výkonnosti a zlepšily užité vlastnosti. K tomuto zlepšení přispívají technologie tepelného zpracování a povrchových úprav. Mají-li během zvýšeného tepelného namáhání zůstat oceli stejné vlastnosti, je nutno zvýšit odolnost proti popouštění. Tyto oceli se zvýšenou odolností proti popouštění se nazývají rychlořezné. Po zavedení slinutých karbidů (SK) se zdálo, že budou rychlořezné oceli vytlačeny, ale ukázalo se, že křehké slinuté karbidy nemohou v některých případech nahradit houževnatější oceli. Úpravou rychlořezných ocelí například tepelným zpracováním a povlakováním, se zvýšila jejich jakost a svoje postavení v technické praxi si zachovaly.

Povlakování je povrchová úprava, která zvyšuje trvanlivost nástroje. Je to technologie, při které se vytváří na povrchu nástrojové oceli tenká vrstva tvrdého materiálu se zvýšenou odolností proti opotřebení. Povlaky se rozdělují do čtyř generací podle stupně vývoje, kde první dvě generace jsou povlaky jednovrstvé. Třetí a čtvrtá generace jsou povlaky vícevrstvé, do nichž patří i nanokompozitní povlaky.

## 1 CHARAKTERISTIKA METODY FRÉZOVÁNÍ

Frézování je jedna z nejvíce používaných výrobních metod, pomocí které obrábíme rovinné nebo tvarové plochy. Obrábění se provádí rotačním vícebřitým nástrojem - frézou. Stroj, na kterém se obrábí je frézka.

Hlavní pohyb je rotační a vykonává ho fréza. Posuv je vedlejším pohybem, který vykonává obrobek. Podle polohy osy nástroje k obráběné ploše se frézování rozlišuje na frézování válcové, kde je osa rovnoběžná s obráběnou plochou a frézování čelní, u kterého je osa kolmá na obráběnou plochu. Od těchto dvou základních způsobů frézování se odvozují i další způsoby, jako je frézování planetové a okružní [1,2].

**Řezná rychlost  $v_c$  [1]** se vypočítá na základě vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1.1)$$

kde:  $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] - řezná rychlost,  
 $D$  [mm] - průměr nástroje,  
 $n$  [min<sup>-1</sup>] - otáčky nástroje.

Posuv u frézování lze udávat třemi možnými způsoby:

- za minutu, posuv za minutu  $f_m$ ,
- za otáčku, doba jedné otáčky frézy  $f_{ot}$ , případně označujeme jen krátce  $f$ ,
- na zub, doba mezi záběrem za sebou následujících zubů  $f_z$ .

**Posuv za minutu  $f_m$  [2]** vypočteme ze vzájemného vztahu:

$$f_m = f_{ot} \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad (1.2)$$

kde:  $f_m$  [mm.min<sup>-1</sup>] - posuv za minutu,  
 $f_{ot}$  [mm] - posuv na otáčku,  
 $f_z$  [mm] - posuv na zub,  
 $z$  [-] - počet zubů nástroje,  
 $n$  [min<sup>-1</sup>] - otáčky nástroje.

Při válcovém nesousledném frézování se **tloušťka třísky  $h_i$**  mění od nulové do maximální hodnoty a při sousledném frézování od maxima do nuly. Jmenovitá tloušťka třísky  $h_i$  v libovolné fázi jejího odřezávání se vyjádří vztahem [1]:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (1.3)$$

kde:  $h_i$  [mm] - tloušťka třísky,  
 $f_z$  [mm] - posuv na zub,  
 $\varphi_i$  [°] - úhel posuvového pohybu.

Průřez třísky je určen jako vrstva obráběného materiálu, která má být odebrána působením ostří nástroje. Adekvátně k „průřezu třísky“ lze použít pojem „plocha řezu“ nebo pojem „plocha průřezu třísky“ [3].

**Jmenovitý průřez třísky  $A_D$**  je plocha průřezu třísky v rovině řezu  $P_D$  v určitém čase. Pro praktické účely přibližně platí [3]:

$$A_D = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi \quad (1.4)$$

kde:  $A_D$  [mm<sup>2</sup>] - jmenovitý průřez třísky,  
 $a_p$  [mm] - hloubka řezu,  
 $f_z$  [mm] - posuv na zub,  
 $\varphi$  [°] - úhel posuvového pohybu.

### 1.1 Válcové frézování

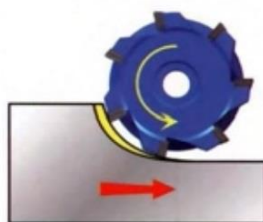
Charakteristickým znakem válcového frézování je proměnlivá hloubka odebírané vrstvy. Uplatňuje se při práci s válcovými a tvarovými frézami. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. Zuby frézy jsou vytvořeny po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování nesousledné a sousledné [1,2].



Obr. 1.1 Nástrčná válcová čelní fréza [4].

#### 1.1.1 Sousledné frézování

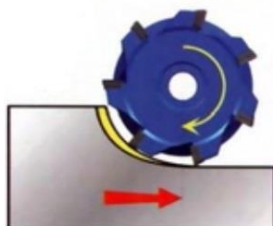
Smysl rotace nástroje je při sousledném frézování ve směru posuvu obrobku. Při vnikání zubu frézy do obrobku vzniká maximální tloušťka třísky, která se postupně zmenšuje až do nuly. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem dolů, proti stolu stroje, což umožňuje zmenšovat upínací síly. Sousledné frézování zmenšuje náchylnost stroje ke chvění a umožňuje zvýšit  $f_z$  při nezměněné trvanlivosti, a tím dosáhnout vyšší výkonnosti obrábění. Další výhodou je obvykle menší sklon k tvoření nárůstků a menší drsnost obrobeného povrchu [1,2].



Obr. 1.2 Sousledné frézování [5].

### 1.1.2 Nesousledné frézování

Smysl rotace nástroje je při nesousledném frézování proti směru posuvu obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. Část řezné síly při nesousledném frézování působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu stroje. Při obrábění zde vznikají silové účinky a deformace, které způsobují zvýšené opotřebení břitu, ale výhodou je, že trvanlivost nástroje nezávisí na okujích, písčitém povrchu obrobku apod. Záběr zubu frézy při jejich vřezávání nezávisí na hloubce řezu [1,2].



Obr. 1.3 Nesousledné frézování [5].

### 1.2 Čelní frézování

U čelního frézování pracuje fréza současně sousledně i nesousledně. Čelní frézování se uplatňuje při práci s čelními frézami, které mají břity vytvořeny na obvodě i čele nástroje. Podle polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše se rozlišuje symetrické (osa nástroje prochází středem frézované plochy) a nesymetrické frézování (osa nástroje je mimo střed frézované plochy) [1,2].



Obr. 1.4 Stopková válcová čelní fréza [4].

### 1.3 Frézovací nástroje

Frézovací nástroje patří po soustružnických nožích mezi nejdůležitější obráběcí nástroje. Vzhledem k velkému uplatnění se ve strojírenské výrobě používá mnoho typů fréz. Frézováním vyrábíme jak rovinné, tak i tvarové plochy. Frézy jsou vícebřité, někdy i tvarově složité nástroje, které lze v závislosti na jejich technologickém užití třídit do jednotlivých skupin podle různých hledisek [1,6].

#### Rozdělení fréz:

Podle **umístění zubů** na tělese nástroje [1,6]:

- válcové (mají zuby na válcové ploše),
- válcové čelní (mají zuby na čelní i válcové ploše),
- čelní (mají zuby na čelní ploše).

Podle **provedení tvaru zubů** [1,6]:

- frézované zuby (čelo i hřbet tvoří rovinné plochy),
- podsoustružené zuby (hřbetní plocha je vytvořena podsoustružením nebo podbroušením jako část Archimedovy spirály). Předností podsoustružených zubů je, že při ostření na čele se jejich profil mění jen nepatrně, takže se využívají především pro tvarové frézy.

Podle **průběhu ostří** dělíme na frézy [1,6]:

- s přímými zuby,
- se šikmými zuby,
- se zuby ve šroubovici, zuby ve šroubovici vnikají do záběru postupně, takže řezný proces je plynulý a klidnější. Sklon šroubovice je  $10^\circ$  až  $45^\circ$  a někdy i více.

Podle **upnutí** dělíme na frézy [1]:

- s upínací stopkou,
  - válcovou,
  - kuželovou,
- nástrčné s upínacím otvorem.

Podle **smyslu otáčení** [6]:

- pravořezné,
- levořezné.

Podle **konstrukčního uspořádání** [1,6]:

- frézy celistvé (jsou celé vyrobeny z jednoho a to řezného materiálu),
- frézy s vloženými noži,
- frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD jsou mechanicky upevněny k tělesu frézy).

Podle **počtu zubů vzhledem k průměru frézy** se rozlišují frézy [1,6]:

- jemnozubé,
- polohrubozubé,
- hrubozubé.

Pro klidný chod frézy má být počet zubů takový, aby současně řezaly nejméně dva zuby.

Podle **nástrojového materiálu zubů** se rozlišují frézy [1,6]:

- z rychlořezné oceli,
- slinutých karbidů,
- cermetů,

- řezné keramiky,
- KNB (kubický nitrid boru) a PKD (polykrystalický diamant).

#### 1.4 Upínání frézovacích nástrojů

Pro upínání válcových nástrčných fréz na frézkách se používají krátké a dlouhé frézovací trny. Poloha frézy na dlouhém trnu se zajišťuje volně navlečenými rozpěrnými kroužky. Kromě rozpěrných kroužků je na trnu vodící pouzdro, které je součástí posuvného podpěrného ložiska, umístěného na výsuvném rameni vodorovné frézky. Pouzdro je ustaveno v poloze, kde bude trn ložiskem podepřen. Aby upnutí nástrojů na trnech bylo co nejtužší, upínají se frézy co nejbližší k vřetenu a výsuvné rameno se přisune k fréze tak blízko, jak je to jen možné [1,2].

Čelní nástrčné a stopkové frézy i frézovací hlavy se upínají krátkými upínacími trny do vřetena stroje. Upínací kužel frézovacích trnů a pracovního vřetena může být například metrický s kuželovitostí 1:20, nebo Morse 1:19 až 20, nebo strmý 1:3,5. Metrický a Morse kužel jsou samosvorné a mohou přenést krouticí moment z vřetena na frézovací trn. Strmý kužel pouze střídá trn v pracovním vřetenu, krouticí moment se přenáší dvěma kameny upevněnými na čele vřetena, které zapadají do vybrání na nákrůžku frézovacího trnu [1,2].

Pomocí redukčních pouzder se upínají frézy s kuželovou stopkou přímo do upínacího kužele ve vřetenu frézky. Redukční pouzdro se použije také tehdy, neshoduje-li se kužel frézovacího trnu s kuželem vřetena. Frézy s válcovou stopkou se upínají do vřetena frézky při použití sklíčidla s upínacím pouzdem [1,2].

V současné době se velmi často frézy s válcovou stopkou o průměru 3÷50 mm upínají pomocí speciálních tepelných nebo hydraulických upínačů. V tepelném upínači je nástroj vložen do tělesa upínače a poté spolu s ním ohříván ve speciálním zařízení pomocí magnetického pole cívky vysokofrekvenčního generátoru. Průběh ohřevu je tak rychlý, že zvýšení teploty nástroje v důsledku vedení tepla je minimální. Poté je upnutý nástroj ochlazen proudem vzduchu a v důsledku smrštění materiálu upínače je fréza spolehlivě upnuta. Uvolnění nástroje se provede ohřevem ve stejném zařízení [1,2].

#### 1.5 Upnutí obrobku

Při frézování vznikají vlivem současného záběru několika zubů frézy velké řezné síly, takže musí být obrobek řádně upnut ve správné poloze. Při upínání nesmí být obrobek vlivem upínacích sil upínače deformován. Také by se mělo dbát, aby upínací a obráběná plocha byly co nejbližší vřetenu stroje [1,2].

Menší obrobky se obvykle upínají do běžných strojních svěráků, otočných a sklopných svěráků, speciálních svěráků pro upínání válcových součástí apod. Uvedené svěráky mohou být ovládány ručně, pneumaticky nebo hydraulicky [1,2].

K upínání větších obrobků se používají rozličné upínací pomůcky, jako jsou upínky, opěrky, podpěry, apod. Všechny tyto upínací pomůcky jsou upevňovány do T-drážek stolu frézky pomocí speciálních šroubů s čtvercovou hlavou [1,2].

## 2 CHARAKTERISTIKA RYCHLOŘEZNÝCH OCELÍ

V roce 1900 byla navržena slitina, jejíž složení bylo později poupraveno na 0,7% C, 19% W, 5,5% Cr, 0,3% V. Kalení slitiny probíhalo při teplotě 1250 – 1290 °C, ochlazování v lázni při teplotě 620 °C a popouštění na teplotě 580 až 590 °C. Tento řezný materiál umožňoval obrábět při vyšších řezných rychlostech, které do té doby znamenaly okamžité zničení nástroje. Řezné rychlosti byly zvýšeny z 5 m.min<sup>-1</sup> na 35 m. min<sup>-1</sup>, a proto byl nástrojový materiál označen jako rychlořezná ocel (**RO**) – **High Speed Steel (HSS)**. Díky tomuto materiálu byly vylepšeny stroje a vyvinuty nové pohony. Rychlořezná ocel vedla k rychlému technickému vývoji [7].

### 2.1 Rozdělení rychlořezných ocelí

Dělení podle chemického složení [8]:

- W - Cr - V
- W-Cr-Mo-V
- W-Cr-V-Co
- W-Cr-Mo-V-Co

RO rozdělené do tří skupin podle výkonu [9]:

- oceli s vysokým výkonem (značky 19 850, 19 851, 19 852, 19 855, 19 856, 19 857, 19 858, 19 859, 19 860, 19 861)
- oceli výkonné (značky 19 802, 19 810, 19 829, 19 830)
- oceli pro běžné použití (značky 19 800, 19 813, 19 820, 19 824).

Rychlořezné oceli s vysokým výkonem mají koeficient řezivosti 1,3. Kromě základních legovacích prvků obsahují navíc ještě 5 až 10 % kobaltu. Tyto rychlořezné oceli jsou vhodné pro řezné nástroje, kde se břit zahřívá na teplotu 640 až 650 °C. Používají se pro obrábění materiálů o vysoké pevnosti nebo houževnatosti, ale také na běžné materiály při použití vysokých rychlostí [9].

Výkonné rychlořezné oceli mají koeficient řezivosti 1 až 1,3. Patří sem oceli s obsahem 10 % wolframu a 2 % vanadu (značena 19 802), ocel se zvýšeným obsahem vanadu a uhlíku (19 810) a wolfram-molybden-vanadové oceli značeny 19 829 a 19 830. V této skupině jsou oceli vhodné pro obrábění materiálů s pevností kolem 900 MPa [9].

Mezi oceli pro běžné použití dnes patří ocel 19 824, která započala vývoj rychlořezných ocelí. Do budoucna se počítá, že dojde ke zrušení výroby oceli 19 824 a 19 800, tudíž ve skupině zůstane jenom ocel 19 829 a 19 813. Koeficient řezivosti je u těchto ocelí menší než jedna. Používají se pro nástroje, které se obrábí průměrnou rychlostí s pevností maximálně do 850 MPa [9].

### 2.2 Značení rychlořezných ocelí

Rychlořezná ocel je podle ČSN 42 002 značena jako 19 8xy. AB, kde:

- xy – se mění podle třídy oceli,
- A – stav ocele (druh tepelného zpracování),
- B – stupeň přetváření.

Tab. 2.1 Značení rychlořezných ocelí [10].

	A	B
0	Nezpracované	Nezpracované
1	Normalizačně žiháno	Lehce válcováno
2	Žiháno	1/4 tvrdý
3	Žiháno na měkko	1/2 tvrdý
4	Kalení	3/4 tvrdý
5	Normalizačně žiháno a popuštěno	4/4 tvrdý
6	Zušlechtěno na dolní pevnost	5/6 tvrdý
7	Zušlechtěno na střední pevnost	Neobsazeno
8	Zušlechtěno na horní pevnost	Speciálně zpevněno
9	Zvláštní tepelné zpracování	Dle zvl. ujednání

Podle norem Evropské Unie (EU) je nově zaváděno zcela odlišné označování nástrojové oceli, které zohledňuje obsah legur.

Tab. 2.2 Značení rychlořezných ocelí podle evropských norem [11].

Základní symboly	
Písmeno	Obsah legujících prvků
HS	n-n
HS = rychlořezné oceli	n-n = čísla oddělená spojovací čárkou, která udávají obsah legujících prvků v následujícím pořadí <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wolfram (W)</li> <li>▪ Molybden (Mo)</li> <li>▪ Vanad (V)</li> <li>▪ Kobalt (Co)</li> </ul>

Například rychlořezná ocel 19 861 (ČSN 41 9861) je v normách EU značena jako: HS 10-4-3-10, s obsahem 10% W, 4% Mo, 3% V a 10% Co [7].

### 2.3 Mechanické vlastnosti

Po tepelném zpracování musí mít rychlořezné oceli vysokou odolnost proti popouštění, tvrdost a pevnost v ohybu. Podle způsobu namáhání se žádají dostatečné plastické vlastnosti. Jedním z hlavních faktorů zajišťujících odolnost proti opotřebení je tvrdost, která se při běžné průmyslové výrobě pohybuje v rozmezí 63 až 65 HRC, u některých značek může být až 67 HRC. Tvrdost břitů se plynule snižuje při zvýšené teplotě. Pevnost v ohybu je u rychlořezné oceli ovlivněna mnoha faktory, jedním z nich je směr tváření. Pokud je vzorek odebrán rovnoběžně se směrem tváření, pohybuje se pevnost v širokých hranicích 3000 až 4000 MPa. Ve směru kolmém na směr tváření klesá až o 30 %. Pevnost v ohybu se zvyšuje především po prvním popouštění, při dalších cyklech se mění již málo. Protože nástroje zhotovené z rychlořezné oceli mají vysokou tvrdost, závisí mechanické vlastnosti také na jakosti povrchu [9].



Tab. 2.3 Doporučení použití rychlořezných ocelí [7,9].

Skupina	Třída	Vlastnosti	Použití
Pro běžné použití	19 820	Velmi dobrá houževnatost, ale nižší odolnost proti opotřebení a proti popouštění. K obrábění materiálu s pevností do 850 MPa. Má větší sklon k oduhličování při tepelném zpracování.	Na nástroje pracující s přerušovaným řezem, ale při menším tepelném namáhání. (Stopkové frézy, vrtáky, nástroje na stříhání, tažení, tváření, razidla a kovádla.)
Výkonné	19 802	Menší houževnatost než 19 829 a 19 830, ale méně náchylná k oduhličení při tepelném zpracování.	Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálu nižší a střední pevnosti.
	19 810	Zvláště vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká odolnost proti popouštění, ale nízká houževnatost a špatná obravitelnost a abrazivita.	Pro obrábění velkými řeznými rychlostmi, pro materiály o pevnosti asi 900 MPa.
	19 829	Vyšší tvrdost, odolnost proti opotřebení větší než 19 830, menší houževnatost.	Pro obrábění při zvětšeném tepelném namáhání. Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálů střední pevnosti i přerušovaným řezem.
	19 830	Nejvyšší houževnatost, odolnost proti opotřebení a dobrá abrazivita.	
Vysoce výkonné	19 850	Velká tvrdost a odolnost proti popouštění, dobrá houževnatost a vysoká řezivost.	Nejvíce namáhané nástroje na těžko obrobitelné, houževnaté a velmi pevné materiály, v nejnáročnějších řezných podmínkách.
	19 851	Velmi vysoká tvrdost, menší houževnatost.	Obrábění nepřerušovaným řezem na pevné materiály.
	19 852	Vyšší odolnost proti opotřebení, dobrá houževnatost.	Obrábění vysokými rychlostmi nebo materiálů vysoké pevnosti.
	19 855	Velká odolnost proti popouštění a opotřebení.	Představuje doplňkový sortiment na nástroje na kovy.
	19 856	Velmi vysoká odolnost proti popouštění, nižší houževnatost.	Obrábění těžkoobrobitelných materiálů vysokými rychlostmi.
	19 857	Velmi vysoká odolnost proti opotřebení, nižší houževnatost.	Nejvíce namáhané nástroje, pro obrábění pevných materiálů.
	19 861	Vysoká odolnost proti opotřebení, dobrá houževnatost, zhoršená abrazivita.	Nejvíce namáhané nástroje, pro obrábění při požadavku na vysokou odolnost proti opotřebení.

## 2.4 Chemické složení

### Uhlík

U dnešních rychlořezných ocelí se pohybuje mezi 0,65 až 1,50 %. Obsah uhlíku ovlivňuje řezivost rychlořezných ocelí, jejich mechanické vlastnosti a tepelné zpracování. Se stoupajícím obsahem uhlíku se zvyšuje řezivost při nepřerušovaném řezu. Při přerušovaném řezu se projevuje nepříznivě snížená houževnatost vyvolaná vyšším obsahem karbidů v matrici eventuálně karbidickou řádkovitostí. Optimální obsah uhlíku při určitém obsahu legovacích prvků je možné určit ze vztahu [7,9,12]:

$$\%C = \frac{1}{30}(\%W + 1,9\%Mo + 6,3\%V) \quad (2.1)$$

### Wolfram

Je základním legovacím prvkem rychlořezných ocelí. Má malou difúzní rychlost, díky které si rychlořezné oceli zachovávají zvýšenou tvrdost i při vyšších teplotách. Teplotní stálost rychlořezných ocelí závisí na množství wolframu, který po zakalení zůstává rozpuštěn v matrici. Oceli se sníženým obsahem wolframu mají lepší plastické vlastnosti, nižší kalicí teplotu a jsou lacinější. Jejich řezivost přitom zůstává stejná [7,9,12].

### Chrom

Rozpuštěný chrom zvýší prokalitelnost, uhlík zakalitelnost. Současně však sníží rozpuštěný uhlík teplotu a v matrici zůstává větší množství zbytkového austenitu. Aby se jeho obsah nezvýšil nad 20 až 25 %, pohybuje se obsah chromu u rychlořezných ocelí kolem (3,5 až 5) %. Při popouštění zpomaluje chrom rozpad martenzitu, podstatně však méně než wolfram, vanad a molybden [7,9,12].

### Vanad

Při zvyšování obsahu vanadu a uhlíku stoupá v matrici množství tvrdých karbidů. Protože mikrotvrdost může být až 3000 HM, zvyšuje se odolnost rychlořezných ocelí proti opotřebení a řezivost. Současně se ovšem zhoršuje obrusitelnost nástrojů. Při vyšším obsahu vanadu je nutno brousit nástroje kotouči z kubického nitridu boru [7,9,12].

### Molybden

Molybden nahrazuje v rychlořezných ocelích buď zcela, nebo zčásti wolfram. Pokud je jeho obsah nižší než asi 5 %, počítá se, že 1 % molybdenu je stejně účinné, jako 1,4 % až 1,9 % wolframu. Podle obsahu molybdenu lze rychlořezné oceli rozdělit do tří skupin:

- oceli s obsahem molybdenu do 2 %, v těchto ocelích zvyšuje molybden řezivost a houževnatost,
- wolframmolybdenové oceli typu 6/5/2, které mají 6% W, 5% Mo a 2% V,
- molybdenové rychlořezné oceli. Převažuje v nich molybden. A wolfram je doplňující přísadou.

Molybden ovlivňuje vlastnosti rychlořezných ocelí podobně jako wolfram. Mají však vyšší houževnatost, takže jsou vhodné zejména na nástroje pracující s přerušovaným řezem. Ale jsou citlivé na oduhličení a přehřátí při kalení [7,9,12].

**Kobalt**

Kobalt netvoří v ocelích karbidy. Vliv kobaltu je silný zejména u ocelí s obsahem uhlíku vyšším než 1,0 % až 1,1 %. Přísada kobaltu zvyšuje odolnost proti popouštění rychlořezných ocelí. Nevýhodou kobaltových rychlořezných ocelí je při tepelném zpracování větší sklon k oduhličování, nižší pevnost, houževnatost a vyšší cena [7,9,12].

**Mangan**

Mangan zhoršuje obrobitelnost rychlořezných ocelí žíhaných naměkko. Při kalení stabilizuje austenit. Při odlévání ingotů je nutno počítat s velkým sklonem manganu k odmišení a s jeho malou difuzní rychlostí. U rychlořezných ocelí bývá proto obsah manganu omezen na max. 0,45 % [7,9,12].

**Křemík**

Obsah křemíku je omezen u běžných typů rychlořezných ocelí na max. 0,45 %, protože křemík stabilizuje delta ferit [7,9,12].

**Titan**

U ocelí na odlitky se přidáním 0,5 % titanu zvyšují mechanické vlastnosti. Ale protože se titan při odlévání okysličuje a na povrchu taveniny se tvoří oxidické blány, legování titanem se nepoužívá [7,9,12].

**Nikl**

Nikl netvoří karbidy, takže se zcela rozpouští v matici, jejíž houževnatost zvyšuje. Protože však zároveň stoupá obsah zbytkového austenitu a zvyšuje se jeho stabilita, omezuje se obsah niklu na max. 0,25 % [7,9,12].

**Bor**

Bor přechází do rychlořezných ocelí z některých feroslitin, které se používají při výrobě. Při obsahu nad 0,008% způsobuje potíže při tváření. Snižuje teplotu natavování hranice zrn, tudíž usnadňuje tvorbu nového eutektika [7,9,12].

**Měď**

Měď zhoršuje tváritelnost, takže se její obsah omezuje na max. 0,25 %. Jako austenitotvorný prvek zvyšuje také stabilitu austenitu [7,9,12].

**Dusík**

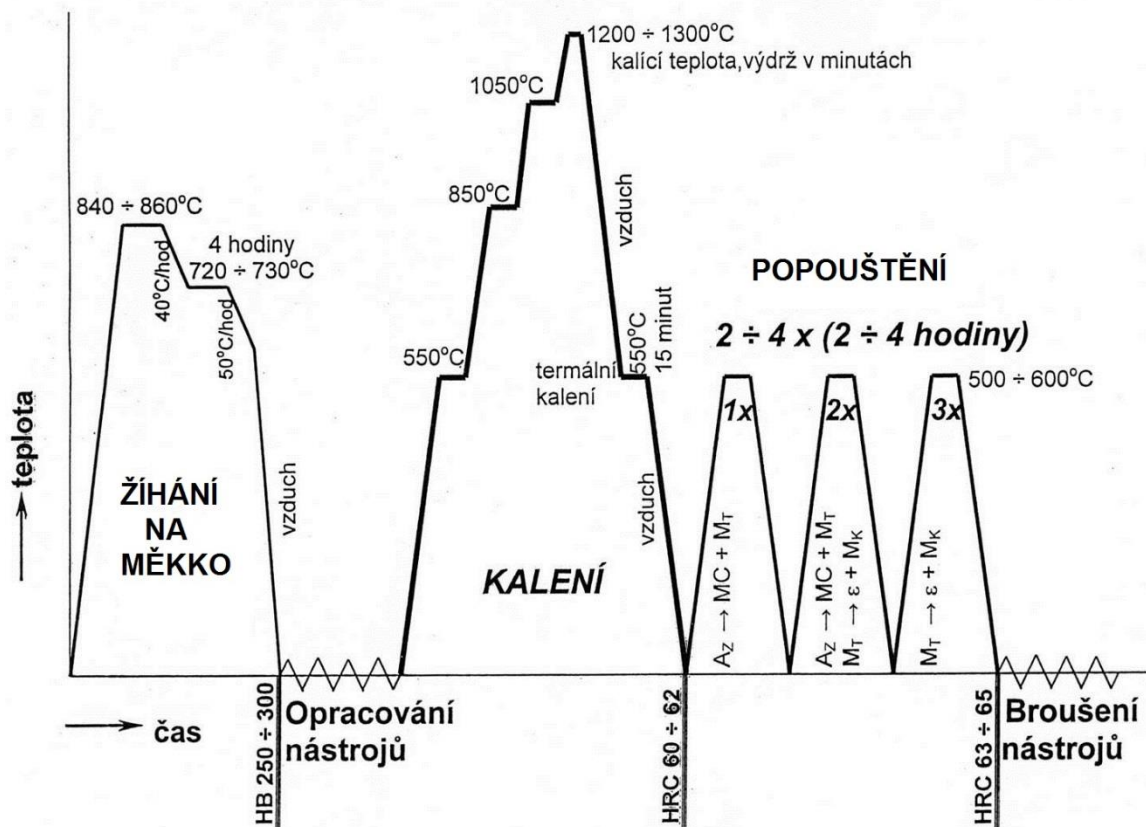
Maximální rozpustnost dusíku v austenitu rychlořezných ocelí je 0,1 %. Při vyšším obsahu již vznikají bubliny. Dusík zvyšuje obsah zbytkového austenitu a snižuje pevnost. Při zvýšení obsahu dusíku z 0,015 na 0,092 % klesla pevnost v ohybu asi o 300 MPa [9,10,5].

**Síra, fosfor**

Obsah síry a fosforu se omezuje na max. 0,035 % [7,9,12].

## 2.5 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí

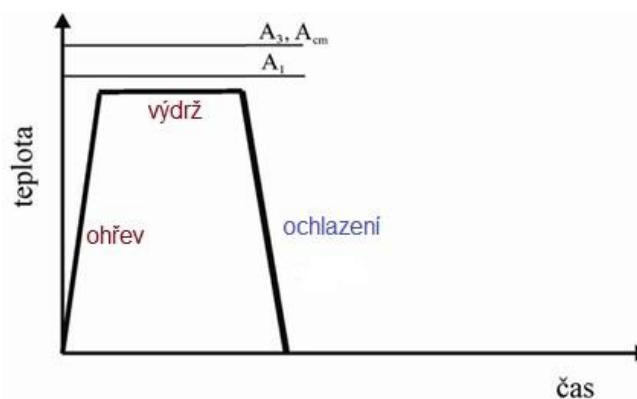
Hlavním tepelným zpracováním je kalení a popouštění, kde získávají rychlořezné oceli mechanické vlastnosti a řezivost. Ke zlepšení obrobiteľnosti se žihají naměkko [9].



Obr. 2.1 Schéma tepelného zpracování rychlořezných ocelí [8].

### Žihání naměkko

Žiháním naměkko se snižuje tvrdost nástroje před obráběním. Používá se také u nástrojů, které se překalují, sníží se tím nebezpečí lomu. Tvrdost se po žihání pohybuje mezi 240 až 270 HB. Při nižší tvrdosti mají nástroje po opracování hrubší povrch, při vyšší tvrdosti se ztíží obrábění. Žihání se provádí ohřevem na teplotu pod překrystalizační teplotou  $A_1$  a následnou výdrží kvůli prohřátí celého materiálu. Poté se ochlazuje na vzduchu, nebo v peci [9,13].



Obr. 2.2 Schéma žihání naměkko [13].

### **Kalení**

Aby měli rychlořezné oceli i za zvýšených teplot zachovanou tvrdost břitů, musí být rozpuštěno v popouštěném martenzitu dostatečné množství wolframu, molybdenu a vanadu, protože tyto prvky zpomalují jeho rozpad při zvýšené teplotě. Nástroje kaleny z vyšších teplot mají vyšší řezivost, pokud je obráběcí rychlost dostatečně velká. Při malých řezných rychlostech například u tváření za studena je vliv kalících teplot malý, protože teplota břitů zůstává relativně nízká. Tvrdost po zakalení závisí na tvrdosti martenzitu a na obsahu zbytkového austenitu. Po kalení ze spodních hranic doporučených teplot je obsah zbytkového austenitu malý, proto je tvrdost nástroje určena tvrdostí martenzitu. Tyto nástroje pak mají vyšší odolnost proti opotřebení, protože v matici zůstává větší množství nerozpuštěných karbidů. Naopak mají oceli nižší odolnost proti popouštění. Při vyšších kalících teplotách převažuje zbytkový austenit, ve kterém se rozpustí větší množství legovacích prvků, takže se zvýší odolnost proti popouštění, ale poněkud klesá odolnost proti opotřebení a tvrdost. Vyšší kalící teploty se proto používají při kalení hrubovacích nástrojů [9].

### **Popouštění**

Po zakalení tvoří strukturu rychlořezných ocelí martenzit, zbytkový austenit, eutektické karbidy a menší množství drobných karbidů. Při postupném zvyšování popouštěcí teploty asi až do 400 °C tvrdost klesá, potom se však tvrdost zvyšuje až do teploty asi 550 °C, kde je tvrdost maximální. Při vyšších popouštěcích teplotách se opět prudce snižuje. Změna tvrdosti závisí na pochodech, které probíhají v martenzitu a ve zbytkovém austenitu. Rychlořezné oceli se popouštějí dva až třikrát. Obsah zbytkového austenitu se po prvním popouštění sníží asi na 10 %. Zvýší se tvrdost, současně ale vznikne pnutí, takže se snižuje houževnatost. U druhého popouštění klesne obsah zbytkového austenitu asi na 5 %, popustí se nově vzniklý martenzit a sníží se pnutí. V technické praxi se obvykle popouští nejprve na teplotě maximální sekundární tvrdosti, teplota posledního popouštění bývá asi o 10 °C nižší. Nástroje se popouští bezprostředně po zakalení, protože austenit se po tří až pětihodinové výdrži znovu stabilizuje a stává se odolným proti popouštění. Komplikované nástroje se vkládají při popouštění do pece s teplotou maximálně 250 až 300 °C [9].

### 3 CHARAKTERISTIKA ZÁKLADNÍCH POVLAKOVACÍCH METOD

Principem povlakování je nanášení tenké vrstvy materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení na podkladový materiál. Nanášený povlak má ve formě tenké vrstvy větší tvrdost a pevnost než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě. Tyto výhodné vlastnosti jsou zapříčiněny tím, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má jemnější zrnitost a méně strukturních defektů jakými jsou póry a dutiny. Povlaky tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje [12,14].

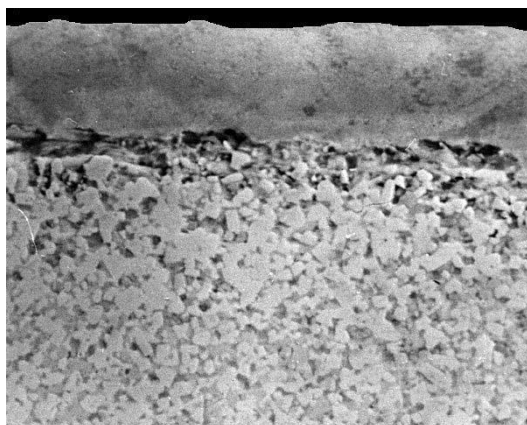
#### 3.1 Rozdělení povlaků do generací

##### 3.1.1 Povlaky 1. generace

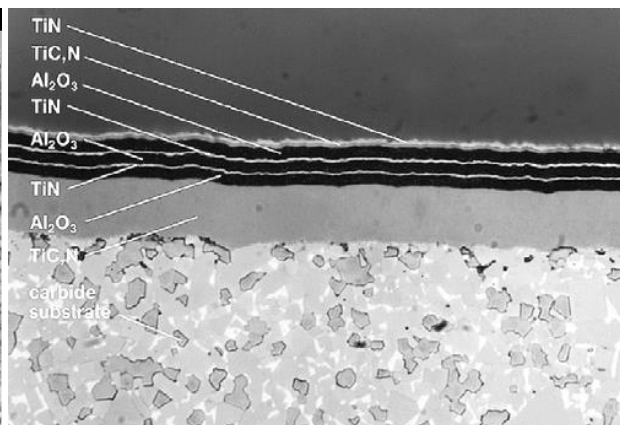
Mezi povlaky 1. generace spadá převážně jednovrstvý povlak TiC s tloušťkou asi 6  $\mu\text{m}$  a špatnou soudržností podkladu a povlaku. Špatná soudržnost byla způsobena nedokonalou technologií výroby, docházelo zde mezi povlakem a podkladem k tvorbě eta-karbidu, který je křehký. Důsledkem toho se povlak při obrábění s těmito nástroji rychle odlupoval, což vedlo k znehodnocování nástroje [1,12].

##### 3.1.2 Povlaky 2. generace

Povlaky 2. generace tvoří opět jednovrstvý povlak, který je výhradně z TiC, TiCN, TiN. Ovšem zdokonalením této technologie výroby nám umožnilo vytvořit povlaky až o tloušťce 10  $\mu\text{m}$ . Navíc se na přechodu mezi podkladem a povlakem zamezilo tvoření eta-karbidu, tudíž zde nehrozí nebezpečí odlupování povlaku při funkci nástroje [1,12].



Obr. 3.1 Povlak 2. generace [1].



Obr. 3.2 Povlak 3. generace [1].

##### 3.1.3 Povlaky 3. generace

Tento stupeň povlakování zahrnuje již vícevrstvý povlak, který je obvykle ze dvou, tří a někdy i více vrstev. Vrstvy jsou na přechodech mezi sebou ostře ohraničeny. Vrstvy jsou nanášeny v pořadí v závislosti na jejich vlastnostech. Na místa nejbližší podkladu jsou nanášeny vrstvy, jež mají lepší přilnavost, ale současně nižší odolnost proti opotřebení. A jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které mají vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení a oxidaci za vysokých teplot. Nejčastější řazení od pokladu k povrchu je v tomto pořadí: TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN [1,12].

### 3.1.4 Povlaky 4. generace

Jedná se o speciální vícevrstvý povlak, složený z více než deseti vrstev a mezivrstev, s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Mezi povlaky 4. generace patří [1,12,15]:

- **Multivrstvý povlak**, který je složený z více než deseti vrstev a mezivrstev, s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Vrstvy jsou zde ze stejných materiálů, jaké se užívají u povlaků 3. generace. Mají schopnost odklánět a zpomalovat šíření trhlin od povrchu povlaku k podkladu, což je jejich velká výhoda.
- **Gradientní vrstvy** (nanogradientní vrstvy) jsou systémy s průběžně proměnným složením vrstvy TiAlN tak, že k povrchu vrstvy se zvyšuje obsah Al, aby zabezpečil vysokou oxidační odolnost při zachování dostatečné tvrdosti vrstvy.
- **Nanovrstvy** představují systém multivrstvy s tloušťkou jednotlivých vrstviček pod hranicí 10 nm. Pokud je rozhraní mezi jednotlivými vrstvičkami s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi dostatečně ostré, pak lze najít optimální periodu střídání vrstviček, při které je tvrdost celé vrstvy výrazně zvýšená.
- **Nanokompozitní vrstvy** díky své originální struktuře představují povlaky s velmi vysokou tvrdostí a zároveň velmi vysokou tepelnou stabilitou a odolností vůči oxidaci.
- **Diamantové vrstvy**

### 3.2 Čištění a příprava před povlakováním

Čištění a úprava povrchu před povlakováním je nejdůležitějším parametrem, který ovlivňuje přilnavost mezi povlakem a podkladem. Pokud jsou na povrchu ostré nerovnosti nebo výrazné stopy po broušení, dochází zde k odlupování povlaku. Proto se na funkčních površích a břitech snažíme tyto nerovnosti odstranit mechanickou úpravou [12].

#### Odmašťování

Používá se pro odstranění mastných látek a jiných konzervačních látek na povrchu nástrojů. Odmašťovadla jsou na bázi ropných derivátů a obsahují dearomatizované uhlovodíky a tenzidy, které zaručují smáčivost a brání nadměrnému odpařování. K odmašťování dochází v běžně dostupných odmašťovacích zařízeních, které se volí podle počtu kusů a velikosti nástrojů [12,16].

#### Mokrě čištění

U mokrého čištění se jedná o kombinaci metod, ve kterých se využívají oplachy, ultrazvuk, odstředění nebo vakuové sušení, elektrochemické metody a vyhřátí či odpaření tekavých kapalin. Čištění se provádí na technologických zařízeních, které tvoří mycí linky. Mycí linky mají několik mycích a oplachových van, případně pouze jednovanový systém s automatickou výměnou jednotlivých lázní [12,16].

Přímo do mycí lázně se dávkovacím čerpadlem dodávají kapalné čisticí prostředky, které jsou většinou pracovním médiem. Prostředí, ve kterém probíhá čištění je alkalické, nejběžnější jsou roztoky obsahující KOH či NaOH. Roztoky mohou obsahovat malá

množství smáčidel nebo kyseliny citronové či fosforečné, pro zvýšení odmašťovacího účinku. Všechny čisticí lázně se provádí v roztocích, které obsahují demineralizovanou vodou [12].



Obr. 3.1 Mycí linka společnosti SHM [17].

Na konci čištění jsou oplachy, které odstraní zbytky čisticích lázní a zároveň i chrání očištěný povrch proti korozi prostřednictvím pasivátorů. V případě, kdy chceme provést čištění před povlakováním jsou nejlepší variantou pasivátory s krátkou dobou působení do dvou dnů. Ty se kombinují s oplachovými lázněmi, u kterých je nezbytné snížit obsah solí a jiných látek, které jsou rozpuštěny ve vodě. Proto je důležité užívat velmi čistou demineralizovanou vodu. Vodivost používaných demineralizovaných vod by se měla pohybovat v řádu desetin  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Zvolené prostředky krátkodobé ochrany však nesmí negativně ovlivnit adhezi připravovaných vrstev. Pasivátory mohou obsahovat alkoholy, organické soli a neionogenní tenzidy [12].

Aby byl povrch co nejkvalitnější a bez zbytkových map, je nutný smáčený povrch co nejrychleji osušit. K tomu slouží různé metody založené na odstředění zbytkové kapaliny nebo jejím odpaření ve vakuu či na vzduchu [12].

### **Pískování**

Tato metoda se používá pouze ve speciálních případech, je vhodná pro sériovou přípravu substrátů. Touto metodou lze odstranit nečistoty pevně ulpívající na povrchu i nečistoty uchyceny v mírné pórovitosti. Jako vhodné médium se používá abrazivo  $\text{SiC}$  nebo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se zrnitostí 20 až 100  $\mu\text{m}$ . Pískování vždy musí zachovat jeho funkční bříty a plochy, proto je tato metoda hlavně založena na zkušenostech, protože bez dlouhodobých experimentů se nedá vyhnout negativním vlivům, jako je zaoblení hran, nebo zmatnění dekorativních či upínacích ploch [12,16].

### **Odjehlování**

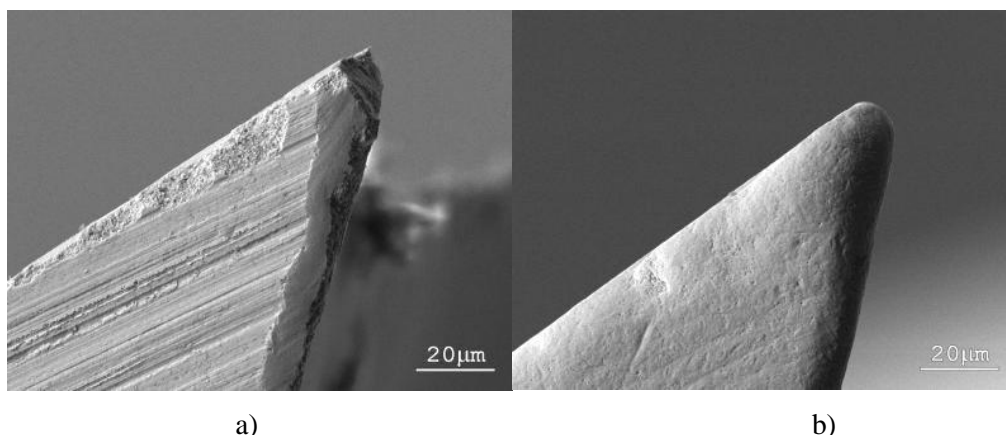
Tato metoda je standardně aplikována již u výrobců, používá se především pro nástroje z rychlořezných ocelí. Odjehluje se ručně nebo kartáčováním. Pokud je nástroj určen pro povlakování, neměly by se používat mosazné kartáče a kartáče s plastovými



vlasy, protože plasty ulpívají v mikroskopických částech na nástroji a poté nejdou běžnými čistícími metodami odstranit [12,16].

### Omílání v granulátech

Omíláním v granulátech lze výrazně zlepšit přilnavost povlaků na funkčních plochách u nástrojů ze slinutých karbidů. Principem metody je nucený pohyb součástky v nádobě naplněné granulátem. Omíláním se odstraní ostřiny na břitech i ostrých hranách a zmenší se nerovnosti na ploše po předchozích nevhodně zvolených čistících operacích. Pro omílání vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů se používá směs jemných abrazivních zrn, například SiC, a drcených ořechových skořápek, které jsou nosičem abraziva [12,16].



Obr. 3.2 Špička nástroje omílaná v granulátech (3.2a před omíláním, 3.2b po omílání) [18].

### Žihání ve vakuu

Tato metoda je používána pro nástroje, které mají vnitřní přívod procesní kapaliny. Žiháním ve vakuu odstraníme z vnitřních přívodních kanálků veškeré nečistoty. V technologickém cyklu povlakování jde o samostatný proces, díky kterému se zabrání znečištění vakuové komory v průběhu vlastního procesu povlakování. Žihání ve vakuu se provádí po určitou dobu na teplotách blízkých se povlakovacím teplotám [12,16].

### 3.3 Metoda PVD

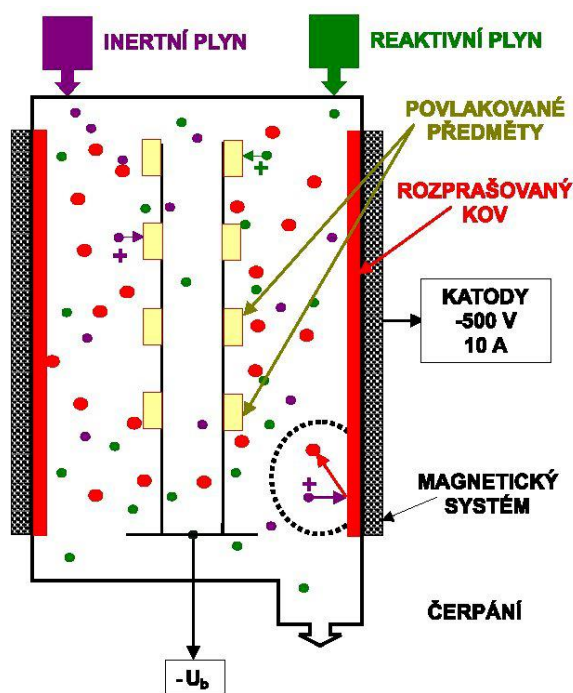
Metoda **PVD** (**P**hysical **V**apour **D**eposition = fyzikální napařování) je charakteristická svými nízkými pracovními teplotami pod 500 °C. Povlaky jsou vytvářeny za sníženého tlaku 0,1 až 1 Pa. Jsou nanášeny ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku o tloušťce 1 až 5 μm. Tato metoda byla díky nízké teplotě, která zaručovala, že nedojde k tepelnému ovlivnění materiálu, původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, avšak v současné době se používá i u břitových destiček z SK. Výhodou je možnost povlakovat i ostré hrany s poloměrem pod 20 μm, na druhé straně vyžaduje mnohem důkladnější přípravu povrchu vzorku před povlakováním a má relativně složitý vakuový systém. Také je nutno pohybovat povlakovaným předmětem, aby byl povlak rovnoměrně ukládán po celé ploše povrchu. Plochy, které jsou odvrácené od místa odpařování povlakového kovu, by bez neustálého pohybu vzorku vytvořily nedokonalou vrstvu, případně by povlak nevytvořily vůbec [1,12].

Povlak metodou PVD je nejčastěji vytvářen [12]:

- Naprašováním,
- napařováním,
- iontovou implantací.

### 3.3.1 Naprašování

Probíhá většinou ve vakuu, nebo při nízkém tlaku ( $< 0,7$  Pa). Naprašovací zařízení se skládá z terče (což je materiál, který má být nanášen), odprašovacího plynu, držáku substrátu, vakuové komory, čerpacího systému a zdroje energie. Terč je zde jako katoda, na níž je připojen záporný potenciál (-500 až -1000 V). Do komory, která plní funkci anody, je připouštěn inertní plyn (zpravidla argon). Před terčem hoří doutnavý výboj vytvořen elektrickým polem, přičemž kladné ionty jsou elektrickým polem urychleny na záporný terč a záporné elektrony dopadají na uzemněnou kostru komory. Těžké ionty při dopadu na terč z jeho povrchu v důsledku přenosu pohybové energie odprašují jednotlivé atomy a rozprášené atomy se usazují na vnitřních površích. Substráty se umísťují před terč, tenká vrstva tedy vzniká především na nich [12,19].



Obr. 3.3 Naprašování [1].

#### Výhody naprašování [12]:

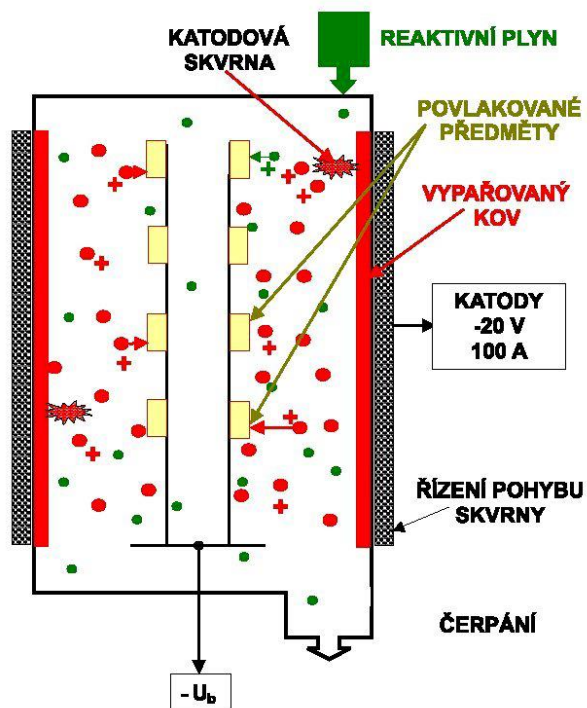
- lze odprašovat a ukládat prvky, slitiny a chemické sloučeniny,
- odprašovaný terč je stabilním zdrojem par a má vysokou životnost,
- v některých uspořádáních může mít terč různé tvary jako prut, deska atd.,
- velmi nízké zatížení tepelnou radiací,
- terč a substrát mohou být umístěny blízko sebe,
- depoziční komora může mít malý objem.

Nevýhody napařování [12]:

- intenzita napařování je ve srovnání s intenzitou tepelného odpařování nízká,
- v mnoha uspořádáních je distribuční tok depozice nerovnoměrný, pro vytvoření povlaku s rovnoměrnou tloušťkou je nutné pohyblivé upevnění substrátu,
- terče jsou často drahé, využití materiálu je špatné,
- většina energie, dopadající na terč, se mění na teplo, které se musí odvádět,
- v některých případech je v plazmě aktivována plynová kontaminace, která znečišťuje povlak více než u napařování,
- u reaktivního napařování je nutné přesné řízení složení plyné atmosféry, aby nedošlo k znečištění terče.

**3.3.2 Napařování**

Při napařování je čistý kov (většinou Ti) odpařován z terčů, které jsou ohřívány pomocí elektrického oblouku, svazkem elektronů nebo klasickým odporovým ohřevem. Odpařování probíhá ve vakuu za tlaku  $10^{-3}$  až  $10^{-8}$  Pa. Emitované atomární částice reagují s atmosférou komory, kterou tvoří inertní a reaktivní plyn (např. Ar a N<sub>2</sub>) a s tepelnou energií 0,1-0,5 eV dopadají na povrch substrátu. Zde jsou usazovány ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku, který je pevně adhezně spojen s podkladem [1,12].



Obr. 3.4 Napařování [1].

Výhody obloukového napařování [12]:

- variabilní uspořádání (obdélníková, kruhová či jiná katoda v libovolné poloze),
- lze odpařovat všechny elektricky vodivé materiály,
- plazmový oblouk efektivně ionizuje odpařovaný materiál i reaktivní plyny,

- před depozicí mohou být ionty materiálu povlaku urychlovány na vysokou energii,
- nízké zatížení tepelnou radiací (katodická oblouková depozice),
- reaktivní plyny jsou aktivovány plazmou, což zlepšuje procesy depozice,
- znečištění terče je mnohem menší než u reaktivního napařování.

#### Nevýhody obloukového napařování [12]:

- lze odpařovat pouze elektricky vodivé materiály,
- vysoké zatížení tepelnou radiací (anodická oblouková depozice),
- roztavené kapénky (makročástice) vyvržené z katody se mohou dostat do povlaku a vytvořit na jeho povrchu kuličky (dopadu makročástic na povlakované předměty lze zabránit použitím elektromagnetického filtru, který ale mnohonásobně snižuje rychlost depozice, takže je vhodný jen pro speciální aplikace, např. v mikroelektronice).

### **3.3.3 Iontová implantace**

Iontová implantace je hybridní PVD proces povlakování, kde je povrch substrátu bombardován svazkem částic s vysokou energií. Protože je mezi substrátem (katoda, záporný potenciál 50 až 1000 V) a zdrojem odpařovaného materiálu vytvořeno silné elektrické pole, dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře, který ionizuje částice plynu i odpařené částice čistého kovu. Reakcí iontů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu substrátu. Daná metoda je v důsledku plazmaticky aktivovaného procesu charakteristická zvýšeným podílem iontů v toku materiálu [1,12].

#### Výhody iontové implantace [12]:

- přesně definované chemické složení povlaku,
- rovnoměrný průběh procesu a s ním spojený dokonalý růst vrstvy povlaku,
- vynikající adheze povlaku k podkladu,
- vysoká hustota povlaku,
- možnost snížení teploty substrátu pod 160 °C,
- široký rozsah podkladových i povlakových materiálů.

#### Nevýhody iontové implantace [12]:

- je třeba řídit mnoho procesních parametrů,
- je často obtížné docílit rovnoměrné bombardování celého povrchu substrátu (nutné pro vytvoření požadovaných vlastností povlaku po celé ploše),
- může dojít k nadměrnému ohřevu substrátu.

### **3.4 Metoda CVD**

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze) probíhá za vysokých teplot 900 až 1200 °C. Je to chemický proces povlakování založen na reakci plynných chemických sloučenin v plazmě, probíhajících přímo na rozhraní mezi plazmatem a povrchem substrátu. Důsledkem toho se na povrchu substrátu vytváří tenká vrstva povlaku. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi, za vysokých teplot

se rozkládají a vrstva vzniká na povrchu substrátu heterogenní reakcí. Základním požadavkem je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale přitom prchavou sloučeninu. Ta se po přivedení energie buď ohřevem, plazmovým obloukem, nebo laserem, chemicky rozkládá. Produkty jejího rozkladu jsou pak uloženy na ohřátý povrch substrátu a působí zde jako katalyzátor. Aby proběhla požadovaná reakce a vytvořila vrstvu povlaku, musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn (např.  $N_2$ ,  $NH_4$ ,  $CH_4$ ). Velkým procentem je v přiváděných plynech obsažen nosný plyn (např.  $Ar$ ,  $H_2$ ), který dopravuje směs plynů k povlakovanému předmětu. Umožňuje tak řízení celého procesu a výrazně ovlivňuje rychlost růstu vrstvy povlaku. Řízením obsahu plynné směsi v čase můžeme dosáhnout plynulé změny ve složení povlakové vrstvy a vytvářet tak multivrstvé povlaky čtvrté generace [1,12,20].

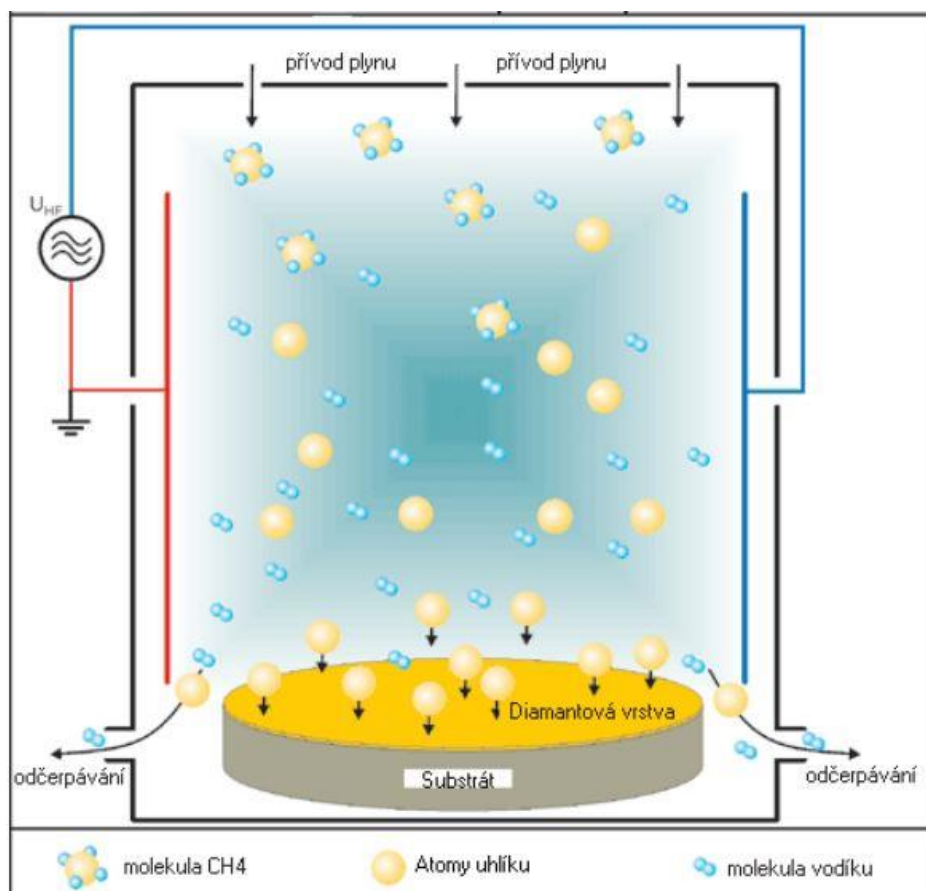
Použití této metody je značně omezeno vysokou teplotou procesu, kdy v řadě případů, nelze tuto metodu použít (např. nástrojové rychlořezné oceli), protože depoziční teplota nesmí být vysoká, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění povlakovaného materiálu, a ke zhoršení tak jejich vlastností. Proto se metoda používá především k depozici nástrojů ze slinutých karbidů [8].

#### Výhody metody CVD [12]:

- vysoká hustota povlaku,
- vysoká teplotní stabilita povlaku,
- možnost nanesení vrstev o větší tloušťce ( $10\div 13\text{ }\mu\text{m}$ ),
- vysoká homogenita povlaku (dobré pokrytí substrátu),
- vynikající adheze k podkladovému materiálu, rovnoměrná tloušťka u tvarově složitých nástrojů a součástí,
- možnost vytvářet poměrně složité vrstvy, a to nejen nitridů kovů ( $Al_2O_3$ , uhlíkové kluzné vrstvy, diamantové vrstvy),
- ekonomická výhodnost tvorby silných vrstev povlaků,
- povlakování předmětu ze všech stran v důsledku poměrně vysokých pracovních tlaků plynné směsi ( $1\div 100\text{ kPa}$ ),
- relativně nízké pořizovací i provozní náklady, slučitelnost s ostatními výrobními postupy.

#### Nevýhody metody CVD [12]:

- vysoké pracovní teploty, které mohou mít nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu i samotného povlaku,
- nelze vytvářet některé typy povlaků (např. kombinací různých typů kovů –TiAlN),
- nelze napovlakovat ostré hrany,
- vysoká energetická náročnost,
- dlouhý pracovní cyklus 8 až 10 hodin,
- ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi (toxické chloridy),
- tahová napětí ve vrstvě (rozdílný koeficient délkové roztažnosti).



Obr. 3.5 Princip povlakovacího zařízení pro metodu CVD [21].

### 3.5 Vlastnosti povlaků

Mechanické a fyzikální vlastnosti povlaků lze nejvíce ovlivnit druhem povlaku a jeho tloušťkou, metodou povlakování a substrátem. Drsnost povrchu a koeficient tření je důležitý pro řezný výkon. Opotřebení může být dvojího charakteru a to abrazivního a tepelného, kde abrazivní opotřebení je ovlivňováno tvrdostí a tepelné opotřebení termochemickou stabilitou. Odolnost povlaku proti těmto opotřebení závisí na typu povlaku. Povlak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  má vynikající termochemickou stabilitu a vykazuje vyšší trvanlivost než  $\text{TiC}$  při vysokých řezných rychlostech, kde převládá tepelné opotřebení. Avšak s poklesem řezné rychlosti, kdy začíná převládat abrazivní opotřebení, narůstá trvanlivost u povlaku  $\text{TiC}$ , který je tvrdší než  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (viz tab. 3.1). Povlaky  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jsou tudíž používány pro vysoké řezné rychlosti, zatímco  $\text{TiC}$  se používá u nižších řezných rychlostí. Díky svým mechanickým a chemickým vlastnostem je  $\text{Al}_2\text{O}_3$  používáno v mnoha typech vícevrstvých povlaků [12].

Tab. 3.1 Obecné porovnání vlastností základních povlakovaných materiálů [12].

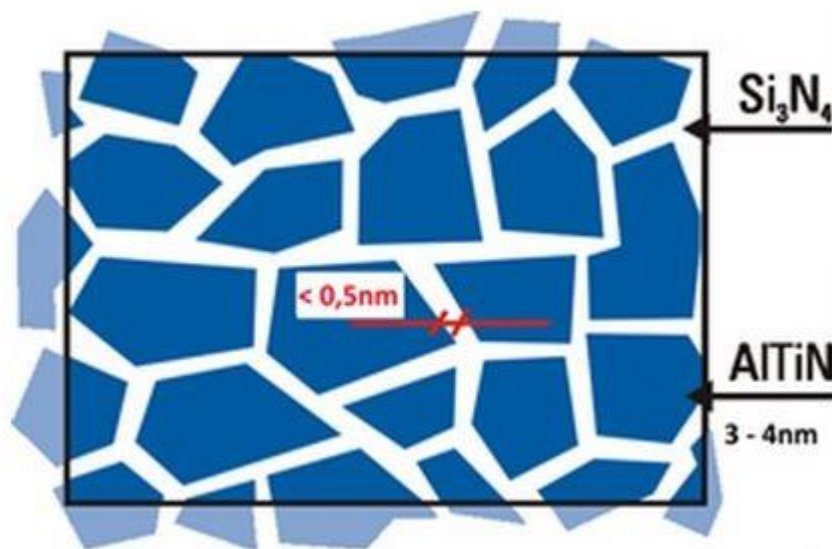
Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
<div style="text-align: center;"> <p>Nejlepší</p> <p>↑</p> <p>Špatná</p> </div>	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiC}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
	$\text{TiAlN}$	$\text{TiAlN}$	$\text{TiAlN}$	$\text{TiAlN}$
	$\text{TiN}$	$\text{TiN}$	$\text{TiCN}$	$\text{TiN}$
	$\text{TiCN}$	$\text{TiCN}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiCN}$
	$\text{TiC}$	$\text{TiC}$	$\text{TiN}$	$\text{TiC}$

## 4 NANOKOMPOZITNÍ POVLAKY NANESENÉ NA FRÉZOVACÍ NÁSTROJE Z HSS OCELÍ

### 4.1 Charakteristika nanokompozitních povlaků

Jedná se o nanokrystalický kompozit, který vznikl dalším vývojem multivrstvých povlaků. Nanokrystalické materiály mají velikost zrna  $\leq 10$  nm a jejich chování je určeno především procesy probíhajícími na hraničních oblastech. Počet atomů v hraniční oblasti je větší nebo stejný jako počet atomů v zrnech. Za těchto podmínek neexistují dislokace, protože hranice zrn brání jejich tvorbě a hraniční oblasti hrají rozhodující roli při deformaci materiálu. Dislokační aktivitu, která je u konvenčních materiálů převládajícím procesem deformace, zde nahrazuje nový mechanismus deformace, označován jako kluz po hranicích zrn. Nanokrystalické materiály lze připravit pouze pomocí metod, které současně zajistí vysokou rychlost nukleace a nízkou rychlost růstu zrn. Toho lze snadno dosáhnout, budou-li materiály vyráběny ve formě povlaků [12,14,15,17].

Nanokrystalický kompozitní povlak je tvořen malými monokrystaly s rozměry v rozsahu 3 až 5 nm, které jsou zakotvené ve vhodné amorfni matrici s tenkými mezikrystalickými hranicemi kolem 0,3 nm. Jedná se o termodynamicky stabilní materiály a to i z hlediska zrnitosti. Nedochází tedy k nárůstu zrn ani při vyšších teplotách. Hranice zrn slouží jako efektivní bariéra proti šíření poruch, tím je dána vysoká tvrdost těchto materiálů [12,17].



Obr. 4.1 Struktura nanokompozitního povlaku [12,17].

### 4.2 Výrobci frézovacích nástrojů vyrobených z HSS

Výrobou nástrojů z HSS se zabývají výrobci jako EMUGE-FRANKEN, GÜHRING, MONOMETAL, ISCAR, CKP CHRUDIM, ASTRA MOTOR, STIM ZET, CROMWELL a další.

Největším tuzemským výrobcem fréz z RO je společnost **ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s.** Její počátky výroby fréz sahají do 30. let 20. století, kdy byla výroba nástrojů jednou z částí strojírenské výroby koncernu Baťa, kde byly vyráběny hlavně pro potřebu vlastní firmy. V roce 1992 vznikla uvnitř ZPS a.s. dceřiná společnost

ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s., která je od roku 2001 samostatnou akciovou společností. Společnost má dvě výrobní divize (Divize Frézy a Divize Tepelného zpracování) a dvě obslužné divize (Divize Správa a Divize Marketing a obchod) [4].

V divizi frézy je předmětem výroba fréz z rychlořezných ocelí, do kterých patří HSS, HSSE, HSSCo5, HSSCo8 a HSSE-PM. Frézy odpovídají normám DIN a ČSN. Výrobní sortiment zahrnuje širokou nabídku nejen stopkových fréz, ale i frézy s Morse kuželem, strmým kuželem, frézy tvarové se stopkou i s otvorem, kotoučové frézy a v neposlední řadě též frézy speciální dle požadavků zákazníka [4].

Používané materiály k výrobě HSS fréz [4]:

- **HSS** - Rychlořezná ocel středního výkonu, vhodná z hlediska houževnatosti na frézy menších průměrů a frézování materiálů do pevnosti 900 MPa.  
Norma: ČSN 19 830, DIN 1.3343, ENHS 6-5-2, AISI M 2,  
chemické složení: 0,90 % C, 4,1 % Cr, 5,0 % Mo, 1,8 % V, 6,4 % W,  
tvrdost: 62 - 65 HRc.
- **HSSE** - Litá, vysoce výkonná rychlořezná ocel s dobrou houževnatostí, vhodná především pro nástroje větších průměrů a kotoučové frézy.  
Norma: PN 422993, ENHS 6-5-3,  
chemické složení: 1,15 % C, 4,1 % Cr, 3,1 % Mo, 3,1 % V, 6,5 % W,  
tvrdost: 63 - 67 HRc.
- **HSS Co5** - Vysoce výkonná rychlořezná ocel s dobrou houževnatostí pro frézy a pro frézování materiálů do pevnosti 1200 MPa.  
Norma: ČSN 19852, DIN 1.3243, EN ENHS 6-5-2-5, AISI M 35,  
chemické složení: 0,92 % C, 4,1 % Cr, 5 % Mo, 1,9 % V, 6,4 % W, 4,8 % Co,  
tvrdost: 63 - 67 HRc.
- **HSS Co8** - Vysoce výkonná ocel s dobrou houževnatostí a výbornou teplotní odolností. Vhodná především pro frézování vysoce pevných materiálů, austenitických ocelí, ocelí pro tváření za tepla atd.  
Norma: DIN 1.3247, ENHS 2-10-1-8, AISI M 42,  
chemické složení: 1,1 % C, 3,9 % Cr, 9,2 % Mo, 1,2 % V, 1,4 % W, 7,8 % Co,  
tvrdost: 63 - 68 HRc.
- **HSSE-PM** - Vysoce výkonná ocel vyrobená pomocí práškové metalurgie. Má homogenní strukturu, která se projevuje vyšší rozměrovou stálostí a trvanlivostí ostří nástroje. Vhodná pro obrábění vysoce pevných a těžce obrobitelných materiálů jako např. titanu a jeho slitin. Frézy z této oceli jsou standardně dodávány s povlakem AlTiN.  
Norma: ENHS 6-5-3-8,  
chemické složení: 1,28 % C, 4,2 % Cr, 5 % Mo, 3,1 % V, 6,4 % W, 8,5 % Co,  
tvrdost: 64 - 67 HRc.

Pro zvýšení užitné hodnoty fréz společnost standardně poskytuje univerzální povlak TiAlN. ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE však spolupracují se společností LISS, která umožňuje nanášení více typů povlaků, součástí kterých jsou i nanokompozitní, na HSS frézy.



### 4.3 Společnosti zabývající se depozicí PVD povlaku na HSS frézy

Akciová společnost **LISS**, patří do silné švýcarské skupiny B.C.I. group a je producentem špičkových povrchových úprav materiálů, dosahovaných galvanickými operacemi nebo fyzikálními vakuovými metodami nanášení tenkých vrstev. Povlakování se věnuje již od roku 1997. Největší rozvoj v současné době zaznamenává povlakovací centrum PLATIT, které pro své odběratele nanáší metodou PVD velmi tvrdé a ořezuvzdorné vrstvy [18].

Pro depozici tenkých povlaků firma používá technologii PVD a PACVD, které jsou celosvětově používány až z 90 % pro produkci povlaků. U PVD depozic je používána technologie jak naprašování, tak i katodového obloukového napařování [18].

Společnost LISS má pro povlakování více typů zařízení (pi1000, pi311, pi200, pi80, micopi80, pi411), pro nanášení nanokompozitního povlaku je nejvhodnější zařízení pi300, kterého je ve společnosti největší počet a umožňuje katodové obloukové napařování a plasma assisted CVD [18].



Obr. 4.2 Zařízení pi311 [18].

Mezi řadou různých povlaků, co společnost LISS poskytuje, jsou tři nanokompozitní povlaky [18]:

- **nACo** - (nc-AlTiN)/(a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) Používá se pro frézování ocelí s vysokou pevností, frézování litin, obrábění kalených ocelí, obrábění za sucha a stříhání ocelí s vysokou pevností. Má vysokou tvrdost a extrémně vysokou tepelnou odolnost.



Obr. 4.3 Fréza s povlakem nACo [18].

- **nACo<sup>3</sup>** – Trojitá vrstva TiN + AlTiN + nACo s výbornou adhezí. Vrchní vrstva s velmi vysokou tvrdostí a tepelnou odolností. Využívá se pro obrábění tvrdých, kalených a abrazivních materiálů, obrábění za sucha, vysokorychlostní obrábění a pro stříhání.
- **nACRo** - (nc-AlCrN)/(a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) Používá se pro obrábění houževnatých a těžko obrobitelných materiálů. Je vysoce odolný vůči abrazivnímu a tepelnému poškození.

Tab. 4.1 Typy a vlastnosti vrstev, používaných společnostmi LISS [18].

	Barva	Nanotvrdost [GPa]	Tloušťka [μm]	Koef. tření (proti oceli)	Max. teplota použití [°C]
TiN	zlatá	24	1-7	0,55	600
TiAlN Multivrstva	fialověčerná	28	1-4	0,6	700
AlTiN	černá	33	1-4	0,7	850
AlTiN G	černá	34	1-4	0,7	900
TiCN-MP	bronzověhnědá	32	1-4	0,2	400
TiCN	šedá	35	1-4	0,2	400
MOVIC® (MoS <sub>2</sub> )	černá	20	0,5-5	0,1	400
DLC	černá	25	0,5-4	0,15	400
Blaktop®	černá	10	0,5-3	0,15	400
CrN	kovověstříbrná	18	1-7	0,3	700
AlTiCrN	šedomodrá	34	1-4	0,55	900
CrTiN	kovověstříbrná	30	1-7	0,4	600
nAC o®	fialověčerná	45	1-4	0,45	1200
nACR o®	šedomodrá	40	1-4	0,35	1100
nAC o3®	fialověčerná	45/34	1-4	0,45	1200/900
AlXN3®	černošedá	32	2-4	0,4	900
GRA DVlc® (TiAlN+CBC)	černá	28	1,5-5	0,15	400
STARVlc® (TiCN- MP+MOVIC)	černá	32	1,5-5,5	0,15	400
ZrN	bílozlatá	20	1-4	0,4	550
Duplex TiCN	šedá	37	1-4	0,2	400



Obr. 4.4 Fréza s povlakem nACRo [18].

Další společnost na trhu zabývající se povlakováním nástrojů je **SHM**. Společnost SHM má mateřský závod v Šumperku a byla založena roku 1993. Jejím hlavním předmětem podnikání je příprava povlaků PVD metodou. K nanášení povlaků využívá technologie odpařování pomocí nízkonapěťového oblouku a magnetronové naprašování [17].

Mezi řadou povlaků nabízených společností SHM jsou čtyři nanokompozitní povlaky:

- TripleCoating Cr
- Marwin Si
- Marwin G
- Alwin

### TripleCoating Cr

Povlak tvořený adhezí vrstvou TiN, středovou vrstvou AlTiN a vrchní nanokompozitní vrstvou CrAlSiN. Povlak TripleCoating Cr představuje nejmodernější povlak na trhu, který kombinuje vynikající houževnatost a tvrdost vrstvy AlTiN a extrémně vysokou tvrdost nanokompozitní vrstvy CrAlSiN [17].



Obr. 4.5 Fréza s povlakem TripleCoating Cr [17].

### Marwin Si

Nanokompozitní povlak TiAlSiN tvořený základní vrstvou s vysokou tvrdostí a povrchovou vrstvou s vysokou tepelnou i chemickou stabilitou [17].



Obr. 4.6 Fréza s povlakem Marwin Si [17].

Tab. 4.2 Vlastnosti povlaku [17].

	Mikrotvrdost [GPa]	Tloušťka [μm]	Drsnost Ra [μm]	Max. teplota použití [°C]
Marwin Si	45	2-3	0,10 - 0,20	1000

### Marwin G

Nanovrstevný gradientní systém AlTiN, který je tvořený vrstvou s plynulou změnou složení [17].



Obr. 4.7 Fréza s povlakem Marwin G [17].

Tab. 4.3 Vlastnosti povlaku [17].

	Mikrotvrdost [GPa]	Tloušťka [μm]	Drsnost Ra [μm]	Max. teplota použití [°C]
Marwin G	38	2-3	0,10 - 0,20	900

### Alwin

Nanokompozitní povlak CrAlSiN s vysokým obsahem chromu [17].

Tab. 4.4 Vlastnosti povlaku [17].

	Mikrotvrdost [GPa]	Tloušťka [μm]	Drsnost Ra [μm]	Max. teplota použití [°C]
Alwin	35	2-4,5	0,15 – 0,20	1000

Společnost **CemeCon s.r.o.** sídlí v Ivančicích a byla založena roku 2006 jako dceřiná společnost firmy CemeCon AG. K nanášení povlaků používá PVD metodu magnetronového naprašování. Díky kvalitním povlakům si firma CemeCon dokázala najít místo ve společnostech jako Škoda Auto a.s., BOSCH DIESEL s.r.o., nebo Narex Ždánice, spol. s.r.o. a udržet se tak na českém trhu [22].

**TINALOX® SN<sup>2</sup>**

Povlak od společnosti CemeCon z úspěšné generace supernitridů. Supernitridy jsou povlaky, které díky své nanokompozitní struktuře vykazují vysoký stupeň tvrdosti, stejně jako maximální trvanlivosti. Stejně jako všechny ostatní povlaky je vytvořen magnetronovým naprašováním a vyznačuje se extrémně hladkým povrchem. Používá se pro obrábění od běžných ocelí, přes korozivzdorné oceli až po obrábění litin. Jeho mikrotvrdost je 3500 HV<sub>0,05</sub> a maximální pracovní teplota 1000 °C [22].



Obr. 4.8 Fréza s povlakem TINALOX® SN<sup>2</sup> [22].

**HSN<sup>2</sup>**

Je extrémně tvrdý, hladký, tepelně stabilní a chemicky odolný povlak s nanokompozitní strukturou. Je vhodný pro obrábění zušlechtěných a těžce obrobitelných materiálů. Jeho mikrotvrdost je 3800 HV<sub>0,05</sub> a maximální pracovní teplota 1100 °C [22].



Obr. 4.9 Fréza s povlakem HSN<sup>2</sup> [22].

**Hyperlox®**

Povlak má nanokompozitní strukturu a je zkonstruován tak, aby odolal i těžce obrobitelným materiálům při vysokých řezných rychlostech při minimálním použití řezných kapalin. Vysoký obsah Al ve struktuře vytváří při obrábění na povrchu povlaku tenkou vrstvu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, jenž chrání nástroj před účinky abraze a vytváří tepelnou bariéru mezi nástrojem a obráběnou plochou. Mikrotvrdost je 3700 HV<sub>0,05</sub> a maximální pracovní teplota 1100 °C [22].

**ALOX SN<sup>2</sup>**

Další povlak ze skupiny supernitridů, který se vyznačuje vysokou odolností vůči abrazivnímu opotřebení. Díky nanokompozitní struktuře a nízkému vnitřnímu napětí je docíleno výborné adheze i při větší tloušťce povlaku. Povlak lze použít na frézovací nástroje, ale hlavní využití nachází při vrtání a soustružení. Mikrotvrdost je 3500 HV<sub>0,05</sub> a maximální pracovní teplota 1000 °C [22].

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je zaměřená na nanokompozitní povlaky, nanášené na frézovací nástroje vyráběné z rychlořezných ocelí.

Úvodní část je věnována technologii frézování, která se dělí na frézování válcové a čelní. Válcové frézování lze dále rozdělit na sousledné, kde řezná síla tlačí obrobek do upínače a nesousledné, kde řezná síla naopak vytahuje obrobek z upínače, proto je nutné pevné upnutí. Frézovací nástroje jsou rozděleny na frézy nástrčné s upínacím otvorem a na frézy s válcovou, nebo kuželovou upínací stopkou. Nástrčné frézy jsou upínány na trn, který má kuželovou stopku zpravidla stejnou s kuželem v dutině vřetena frézky. Stopkové frézy s kuželovou stopkou se upínají přímo do dutiny vřetene za pomoci redukčních pouzder a stopkové frézy s válcovou stopkou se upínají do kleštinových upínačů.

Druhá část práce je zaměřena na charakteristiku rychlořezných ocelí, které lze rozdělit podle chemického složení, nebo podle jejich výkonu na oceli s vysokým výkonem, oceli výkonné a oceli pro běžné použití. Důležitým procesem je tepelné zpracování, kde rychlořezné oceli získávají kalením a popouštěním své mechanické vlastnosti a řezivost. Ke zlepšení obrobitelnosti se žíhají naměkko. Tvrdost u rychlořezných ocelí může být až 67 HRC, přičemž při zvýšené teplotě se tvrdost břitů plynule snižuje.

V třetí kapitole jsou popsány základní povlakovací metody PVD a CVD. U metody PVD se jedná o fyzikální proces, kdy je povlak nanášen odpařováním z pevné fáze. Tato metoda je charakteristická svými nízkými pracovními teplotami pod 500 °C, které jsou vhodné pro povlakování rychlořezných ocelí. Ovšem u metody PVD je nutno pohybovat s povlakovaným předmětem, aby byl povlak rovnoměrně ukládán po celé ploše povrchu. Povlaky jsou zde nejčastěji vytvářeny napařováním, napařováním a iontovou implantací. U metody CVD se jedná o chemický proces, který je založen na reakci plyných chemických sloučenin v plazmě. Metoda CVD probíhá za vysokých teplot až 1200 °C, které jsou nevhodné pro povlakování rychlořezných ocelí z důvodů tepelného ovlivnění a zhoršení tak jejich vlastností. Proto se metoda používá především k depozici nástrojů ze slinutých karbidů.

V poslední kapitole jsou charakterizovány nanokompozitní povlaky, které mají velikost zrna  $\leq 10$  nm. U těchto povlaků nedochází k nárůstu zrn ani při vyšších teplotách. Hranice zrn zde slouží jako efektivní bariéra proti šíření poruch, tím je dána vysoká tvrdost těchto materiálů. Na českém trhu se zabývají nanášením nanokompozitních povlaků například společnosti LISS, SHM a CemeCon s.r.o.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. HUMÁR, A. *Technologie I - Technologie obrábění – 1. část*, [online] Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie, 2003, [vid. 2015-02-11], dostupné z: [http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie\\_I.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_I.pdf).
2. VASILKO, Karol. *Top trendy v obrábění* [průručka]. Žilina: Media/St, 2006, 214 s. Stroje, materiály, technologie. ISBN 80-968954-2-7.
3. KOCMAN, K., PROKOP, J., *Technologie výroby II* [online]. [vid. 2015-02-18]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby\\_II.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf).
4. ZPS. *Frézovací nástroje* [online]. [vid. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/frezy-hss/>.
5. TAEGUTEC. *Příručka obrábění* [online]. [vid. 2015-05-01]. Dostupné z: [http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka\\_obrabeni\\_2114.pdf](http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_2114.pdf).
6. NOVOTNÝ, K., ZEMČÍK, O., *Přípravky a nástroje* [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru „Strojírenská technologie“ BS studijního programu „Strojírenství“. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002, 119s. [vid. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/PripravkyNastroje.pdf>.
7. FOREJT, M., PÍŠKA M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
8. NĚMEC, K., *Nástrojové oceli* [online]. [vid. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semestr>.
9. FREMUNT, P., KREJČÍK, J., PODRÁBSKÝ, T. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994. 229 s.
10. ATEAM. *Značení oceli* [online]. [vid. 2015-04-17]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/znaceni\\_oceli.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/znaceni_oceli.pdf).
11. ATEAM. *Evropské normy* [online]. [vid. 2015-03-17]. Dostupné z: [http://ateam.zcu.cz/evropske\\_normy.pdf](http://ateam.zcu.cz/evropske_normy.pdf).
12. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
13. *ÚVOD DO MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ*. [online]. [vid. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-letni-semestr>.
14. *MM Průmyslové spektrum*. Trendy v povlakování [online]. [vid. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>.
15. HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., RŮŽIČKA, M. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *MM Průmyslové spektrum*. 2004 [online]. [vid. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pvd-povlaky-pro-rezne-aplikace-a-tvareni.html>.

16. HOLUBÁŘ, P., ŠÍMA, M., ZINDULKA, O., Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM Průmyslové spektrum*. 2005 [online]. [vid. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html>.
17. SHM. *Nanokrystalické kompozity* [online]. [vid. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/vav-centrum/nanokrystalicke-kompozity/>.
18. LISS. *Katalog povlaků* [online]. [vid. 2015-05-04]. Dostupné z: [http://www.liss.cz/files/KatalogPovlaku2015CZ\\_WEB.pdf](http://www.liss.cz/files/KatalogPovlaku2015CZ_WEB.pdf).
19. LIBRA M., *Naprašování tenkých vrstev* [online]. [vid. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>.
20. KŘÍŽ, A. *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam - materiálový výzkum. [2005] [vid. 2015-04-10]. Dostupný z: [http://www.ateam.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf).
21. ATEAM. *Tenké vrstvy* [online]. [vid. 2015-05-04]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf).
22. CEMECON. *Technologie povlakování* [online]. [vid. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.cemecon.cz/technologie/default.aspx>.



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
<b>CVD</b>	[-]	Chemical Vapour Deposition
<b>EU</b>	[-]	Evropská Unie
<b>HB</b>	[-]	tvrdost dle Brinella
<b>HM</b>	[-]	Martensova tvrdost
<b>HRC</b>	[-]	tvrdost dle Rockwella
<b>HSS / RO</b>	[-]	High Speed Steel / Rychlořezná Ocel
<b>HV</b>	[-]	tvrdost podle Vickerse
<b>PVD</b>	[-]	Physical Vapour Deposition
<b>SK</b>	[-]	slinutý karbid

Symbol	Jednotka	Popis
<b>A<sub>D</sub></b>	[mm]	jmenovitý průřez třísky
<b>D</b>	[mm]	průměr obrobku
<b>a<sub>p</sub></b>	[mm]	šířka záběru ostří
<b>f<sub>m</sub></b>	[mm.min <sup>-1</sup> ]	posuv za minutu
<b>f<sub>ot</sub></b>	[mm]	posuv za otáčku
<b>f<sub>z</sub></b>	[mm]	posuv na zub
<b>h</b>	[mm]	tloušťka třísky
<b>n</b>	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky nástroje
<b>v<sub>c</sub></b>	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
<b>z</b>	[-]	počet zubů nástroje
<b>φ</b>	[°]	úhel posuvného pohybu

